

УДК 621.785.53

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-168-176

**Для цитирования:** Структура поверхностного слоя высокохромистой стали, подвергнутой азотированию в элионном режиме в плазме несамостоятельного дугового разряда с накалившимся катодом / С. П. Ереско, Ю. Ф. Иванов, И. В. Лопатин и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 1. С. 168–176. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-168-176.

**For citation:** Eresko S. P., Ivanov Yu. F., Lopatin I. V. et al. [Structure of the surface layer of high-chrome steel nitridated in the elion regime in the plasma of a suspended arc discharge with a heated cathode]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 1, P. 168–176. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-168-176.

## **Структура поверхностного слоя высокохромистой стали, подвергнутой азотированию в элионном режиме в плазме несамостоятельного дугового разряда с накалившимся катодом**

С. П. Ереско<sup>1\*</sup>, Ю. Ф. Иванов<sup>2</sup>, И. В. Лопатин<sup>2</sup>, А. А. Клопотов<sup>3</sup>, А. В. Никоненко<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН

Российская Федерация, 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/3

<sup>3</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет

Российская Федерация, 634002, г. Томск, пл. Соляная, 2

<sup>4</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 40

\*E-mail: eresko07@mail.ru

*Целью настоящей работы является обнаружение закономерностей формирования структуры поверхностного слоя высокохромистой стали, подвергнутой азотированию в плазме газового разряда низкого давления с использованием плазмогенератора с накалившимся катодом «ПИИНК». Нагревание образцов до температуры азотирования осуществляли ионной компонентой плазмы, а также электронной и ионной компонентами плазмы (элионный режим). Объектом исследования являлась жаропрочная коррозионноустойчивая сталь аустенитного класса марки 20X23H18 (зарубежный аналог AISI 310S). Актуальность исследований обусловлена сравнительно низким уровнем твердости и износостойкости сталей данного класса. Азотирование стали осуществляли на установке «ТРИО», оснащенной блоком коммутации для реализации элионного (электронного и ионного) режима обработки. Установлено, что толщина упрочненного слоя составляет 55–60 мкм и слабо зависит от метода азотирования, температуры (в интервале 793–873 К) и длительности (3–5 ч) процесса. Выявлен режим азотирования, позволяющий формировать поверхностный слой с микротвердостью 13,7 (ионный режим нагревания) и 10,8 ГПа (элионный режим нагревания). Установлено, что высокие прочностные и трибологические свойства азотированной стали обусловлены формированием в поверхностном слое нанокристаллической структуры, основными фазами которой являются нитриды железа Fe<sub>4</sub>N и нитриды хрома CrN. Показано, что нагревание образцов до температуры азотирования в элионном режиме, использующем электронную и ионную компоненту плазмы, приводит к существенно меньшему уровню шероховатости материала по сравнению с образцами, нагревание которых при азотировании осуществляли ионной составляющей плазмы.*

*Ключевые слова:* плазма газового разряда, элионный режим азотирования, высоколегированная сталь, шероховатость, структура, свойства.

## Structure of the surface layer of high-chrome steel nitridated in the elion regime in the plasma of a suspended arc discharge with a heated cathode

S. P. Eresko<sup>1\*</sup>, Yu. F. Ivanov<sup>2</sup>, I. V. Lopatin<sup>2</sup>, A. A. Klopotov<sup>3</sup>, A. V. Nikonenko<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii rabochii prospect, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of High Current Electronics SB RAS  
2/3, Academic prospect, Tomsk, 634055, Russian Federation

<sup>3</sup>Tomsk State University of Architecture and Building  
2, Solyanaya square, Tomsk, 634002, Russian Federation

<sup>4</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
40, Lenina prospect, 634050, Tomsk, Russian Federation

\*E-mail: eresko07@mail.ru

*The purpose of this work is to reveal the patterns of formation of the structure of the surface layer of high-chromium steel subjected to nitriding in a low-pressure gas discharge plasma using a plasma generator with a hot cathode "PINK". Heating of the samples to the nitriding temperature was carried out by the ionic component of the plasma, as well as by the electron and ionic components of the plasma (elion mode). The object of the study was heat-resistant corrosion-resistant steel of the austenitic class grade 20X23H18 (foreign analogue of AISI 310S). The relevance of research is due to the relatively low level of hardness and wear resistance of steels of this class. Nitriding of steel was carried out on the TRIO installation, retrofitted with a switching unit for implementing the aelion (electronic and ionic) processing mode. It has been established that the thickness of the hardened layer is (55–60)  $\mu\text{m}$  and weakly depends on the method of nitriding, temperature (in the range of 793–873 K), and duration (3–5 hours) of the process. A nitriding regime has been revealed that makes it possible to form a surface layer with a microhardness of 13.7 GPa (ionic heating mode) and 10.8 GPa (elion heating mode). It has been established that the high strength and tribological properties of nitrided steel are due to the formation of a nanocrystalline structure in the surface layer, the main phases of which are iron nitrides  $\text{Fe}_4\text{N}$  and chromium nitrides  $\text{CrN}$ . It is shown that heating the samples to the nitriding temperature in the aelion mode, which uses the electron and ion components of the plasma, leads to a significantly lower level of material roughness compared to the samples heated during nitriding by the ion component of the plasma.*

*Keywords: gas discharge plasma, aelion nitriding regime, high-alloy steel, roughness, structure, properties.*

### Введение

Использование дуговых разрядов низкого давления с накаливаемым катодом (концентрация плазмы  $10^{15}$ – $10^{18}$   $\text{м}^{-3}$  в объемах до нескольких  $\text{м}^3$ ), позволяющих генерировать потоки газовой плазмы без микрокапель, осуществлять ионную очистку (травление) поверхности и разогревать обрабатываемую деталь до требуемой температуры, является перспективным для проведения процессов химико-термической обработки [1–3]. При этом, энергия ионов и их средний ток часто оказываются избыточными для ионной очистки обрабатываемой поверхности, что приводит к ее интенсивному травлению и существенному увеличению шероховатости поверхности детали [4; 5]. Для эффективного нагревания подложки в [6; 7] предложено использовать электронную компоненту плазмы разряда. Воздействие низкоэнергетичных (десятки эВ) электронов плазмы разряда с плотностями тока десятки  $\text{А}/\text{см}^2$  не производит травления, однако и не обеспечивает ее очистки. Следовательно, для обеспечения нагревания подложки и ее эффективной очистки необходимо чередование воздействия на нее электронной и ионных компонент плазмы разряда. Такой режим обработки изделий назван элионным, т. е. включающим воздействие как электронной, так и ионной компонент плазмы несамостоятельного дугового разряда с накален-

ным катодом. Сравнительно низкий уровень травления поверхности позволяет рекомендовать элионный режим азотирования деталей и изделий ракетно-космической отрасли, для которых повышение уровня шероховатости поверхности недопустимо.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ эволюции структуры высокохромистой стали, подвергнутой азотированию в плазме несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым катодом в условиях нагревания образцов до температуры азотирования, во-первых, ионной компонентой плазмы и, во-вторых, электронной и ионной компонентами плазмы.

### Материал и методика исследования

Материалом исследования являлись образцы высокохромистой стали марки 20X23H18 (зарубежный аналог AISI 310S) (0,2C-1Si-2Mn-(17-20)Ni-(22-25)Cr-0.02S-0.035P, остальное – Fe, вес.%). Азотирование стали осуществляли на установке «ТРИО», оснащенной блоком коммутации для реализации элионного (электронного и ионного) режима обработки. Параллельно проводили азотирование стали в условиях ионного нагревания образцов. Азотирование проводили при температурах 723–873 К в течение 1, 3 и 5 ч. Температура образцов регулировалась коэффициентом заполнения электронной фазы. Образцы закреплялись на неподвижном держателе в центре камеры на оси источников плазмы таким образом, чтобы держатель находился под углом 60° к каждому из них, а образцы находились на лицевой стороне держателя. Исследование структуры, элементного и фазового состава модифицированной стали осуществляли методами рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии, дефектную субструктуру модифицированного слоя стали изучали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии.

### Результаты исследования и их обсуждение

В работах [8–11] показано, что оптимальным с позиции увеличения твердости поверхностного слоя стали 20X23H18, не зависимо от метода нагревания образцов до температуры азотирования, является следующий режим – температура 793 К, время 3 ч. В этом случае микротвердость образцов 13,7 (ионный режим нагревания) и 10,8 ГПа (элионный режим нагревания). Твердость стали максимальна у поверхности азотирования и монотонно снижается по мере увеличения расстояния от поверхности образца. Толщина упрочненного слоя составляет 55–60 мкм и слабо зависит от метода азотирования. Трибологические испытания стали 20X23H18, подвергнутой азотированию, показали, что в условиях нагревания образцов ионами плазмы минимальное значение параметра износа (максимальная износостойкость) достигается при температуре азотирования 873 К, 3–5 ч и составляет  $k = 0,45 \times 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н} \times \text{м}$ , что меньше параметра износа стали 20X23H18 в исходном состоянии в 350 раз. При азотировании в условиях нагревания образцов в элионном режиме минимальное значение параметра износа (максимальная износостойкость) достигается при температуре азотирования 793 К, 3 ч и составляет  $k = 0,86 \times 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н} \times \text{м}$ , что меньше параметра износа стали 20X23H18 в исходном состоянии в  $\approx 200$  раз. Таким образом, азотирование стали в условиях ионного нагревания образцов позволяет достигать более высоких значений микротвердости и износостойкости по сравнению с элионным методом нагревания. Достигая максимальной твердости при ионном режиме азотирования (793 К, 3 ч), сталь теряет износостойкость, параметр износа образцов для данного режима  $k = 3,44 \times 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н} \times \text{м}$ , что в 4 раза больше параметра износа стали при сопоставимом элионном режиме азотирования (793 К, 3 ч).

Определен уровень шероховатости поверхности образцов. Установлено, что независимо от способа нагревания образцов повышение температуры азотирования в интервале 723–873 К приводит к росту шероховатости поверхности стали [9]. Выявлено, что нагревание образцов до температуры азотирования в элионном режиме приводит к существенно меньшему (в 2,2–3,5 раза) уровню шероховатости материала по сравнению с образцами, нагревание которых при азотировании осуществляли ионной составляющей плазмы.

Очевидно, что выявленное существенное изменение микротвердости и износостойкости стали в условиях азотирования обусловлено преобразованием элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры поверхностного слоя материала. Рассмотрим этот вопрос для одного режима азотирования  $\sim 793$  К, 3 ч. Определение фазового состава азотированного слоя осуществляли методами рентгеноструктурного анализа. Установлено, что основными упрочняющими фазами стали являются нитрид железа состава  $\text{Fe}_4\text{N}$  и нитрид хрома состава  $\text{CrN}$  (рис. 1). Обнаружено, что при одинаковом фазовом составе образцы, подвергнутые азотированию в условиях нагревания двумя указанными выше методами, различаются разным количеством упрочняющих фаз. А именно, в стали, азотированной в условиях нагревания ионами плазмы, относительное суммарное содержание упрочняющих нитридных фаз достигает 89,3 масс. %; в стали при элионном азотировании  $\sim 79,8$  масс. %. При этом, при ионном методе азотирования в поверхностном слое стали присутствует 79 масс. % фазы  $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$  и 10,3 масс. %  $\text{CrN}$  (остальное  $\gamma\text{-Fe}$ ); при элионном азотировании соотношение нитридных фаз иное: 49,7 масс. % фазы  $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$  и 30,1 масс. %  $\text{CrN}$ .

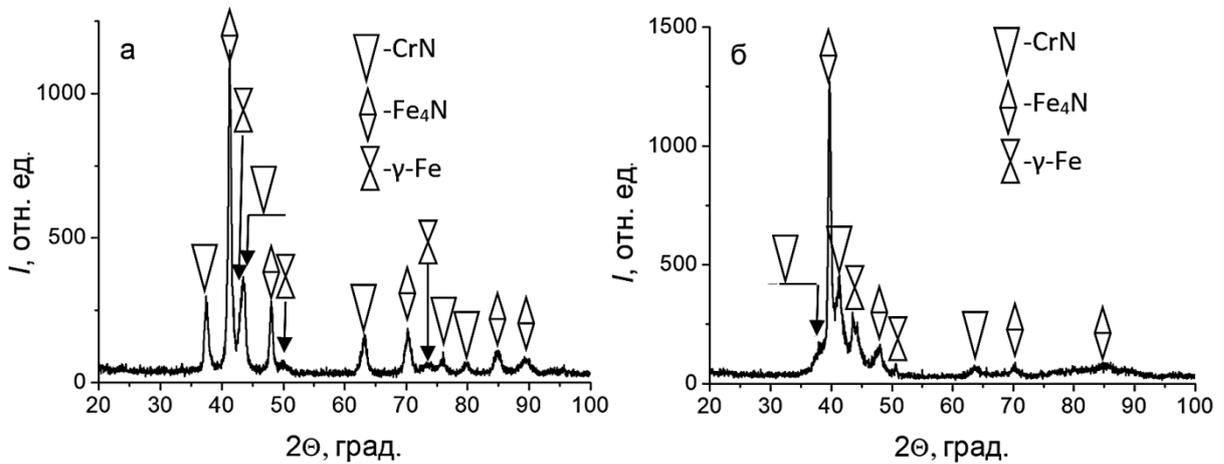


Рис. 1. Фрагменты рентгенограмм стали 20X23H18, подвергнутой азотированию в плазме газового разряда низкого давления:  
 а – элионное азотирование; б – ионное азотирование. Температура азотирования 793 К, время азотирования 3 ч

Fig. 1. Fragments of X-ray diffraction patterns of 20X23H18 steel subjected to nitriding in a low-pressure gas discharge plasma:  
 a – aelion nitriding; b – ion nitriding. Nitriding temperature 793 K, nitriding time 3 hours

В [12] показано, что в бинарной системе Cr–N образуется нитрид хрома  $\text{CrN}$  со структурным типом NaCl (символ Пирсона  $cF8$ ; пространственная группа  $Fm\bar{3}m$ ). В системе Fe–N [12; 13] установлено наличие нитридов  $\gamma(\text{Fe}_4\text{N})$  (символ Пирсона  $cP5$ ; пр. гр.  $Pm\bar{3}m$ ),  $\epsilon(\text{Fe}_3\text{N}_{1+x})$  (символ Пирсона  $hP10$ ; пр. гр.  $P6_322$ ),  $\xi(\text{Fe}_2\text{N})$  (символ Пирсона  $oP12$ ; пр. гр.  $Pbcn$ ) и метастабильного нитрида  $\text{Fe}_{16}\text{N}_2$  ( $\text{Fe}_8\text{N}$ ) (азотистый мартенсит). На диаграмме состояния бинарной системы Fe–N присутствует обширная область существования нитрида  $\epsilon(\text{Fe}_3\text{N}_{1+x})$  с гексагональной сингонией. Тогда как растворимость азота в  $\alpha\text{-Fe}$  с ОЦК решеткой, находящейся в равновесии с  $\gamma(\text{Fe}_4\text{N})$  при температуре 590 °С, составляет всего 0,4 % (ат.).

На рис. 2 приведены изотермические сечения тройных систем C–Cr–N и C–Fe–N, у которых один сплавобразующий элемент является металлом, другой элемент не металл, а третий элемент (азот) является газом. Для системы C–Cr–N (рис. 2, а) характерным является существова-

ние протяженной области гомогенности карбонитрида  $\text{Cr}_2(\text{C},\text{N})$  с гексагональной структурой (символ Пирсона  $hP9$ ; пространственная группа  $P\bar{3}1m$ ). Наличие обширной области гомогенности карбонитрида  $\text{Cr}_2(\text{C},\text{N})$  на основе нитрида  $\text{Cr}_2\text{N}$  отражает высокую растворимость углерода в этом нитриде. При этом области существования карбидов хрома  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  имеют очень ограниченные области гомогенности.

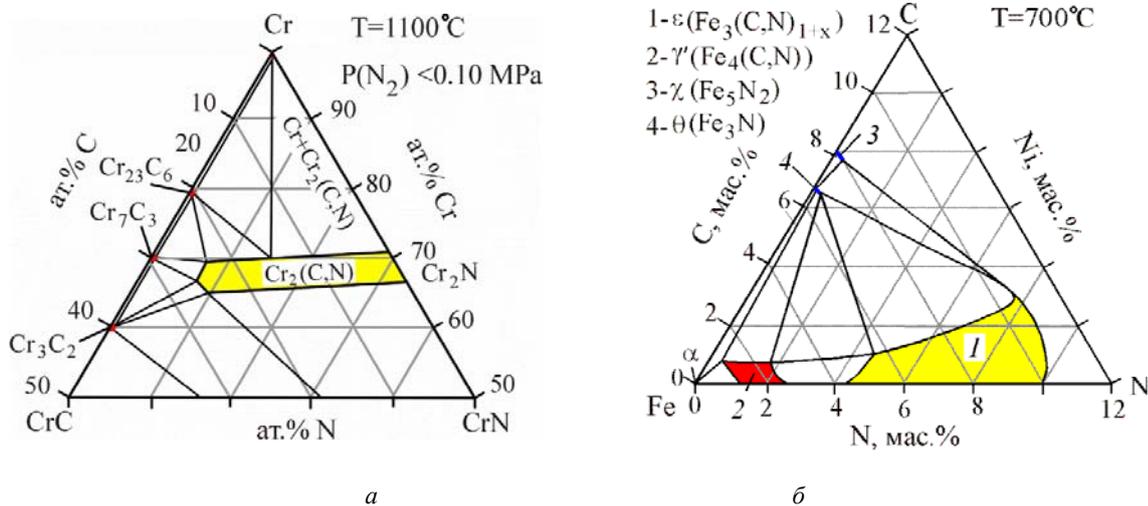


Рис. 2. Изотермические сечения тройных систем C–Cr–N в метастабильном состоянии при температуре 1100 °С и давлении  $P(\text{N}_2) < 0,10$  МПа [14] (а), C–Fe–N при температуре 700 °С [15] (б)

Fig. 2. Isothermal cross sections of C–Cr–N ternary systems in the metastable state at a temperature of 1100°C and pressure  $P(\text{N}_2) < 0.10$  MPa [14] (a), C–Fe–N at a temperature of 700°C [15] (b)

На рис. 2, б представлено изотермическое сечение тройной системы C–Fe–N. Видно, что области существования карбидов  $\theta(\text{Fe}_3\text{C})$ ,  $\chi(\text{Fe}_5\text{C}_2)$  имеют узкие и ограниченные области гомогенности. В тоже время в системе C–Fe–N на изотермическом сечении хорошо проявляется протяженная область гомогенности трехкомпонентного нитрида  $\epsilon(\text{Fe}_3(\text{C},\text{N})_{1+x})$ . Этот нитрид образован на основе двухкомпонентного нитрида  $\text{Fe}_3\text{N}_{1+x}$  на стороне Fe–N изотермического треугольника. Наличие обширной области гомогенности  $\epsilon$  фазы отражает высокую растворимость углерода в этом нитриде. Характерной чертой системы Fe–C–N является наличие обширных двухфазных и трехфазных областей на основе карбидов и нитридов (рис. 2, б).

Морфологию и взаимное расположение фаз в поверхностном слое стали, подвергнутой азотированию, изучали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии. Установлено, что в поверхностном слое толщиной 5–6 мкм (не зависимо от метода азотирования) формируется нанокристаллическая (размер кристаллитов 20–27 нм) многофазная структура, основными фазами которой являются  $\gamma$ -Fe и нитриды хрома CrN и железа  $\text{Fe}_4\text{N}$  (рис. 3). При большем удалении в слое толщиной 30–37 мкм формируется структура пластинчатого типа (рис. 4). Поперечные размеры пластин изменяются в пределах от 15 до 32 нм. Анализ микроэлектрограмм позволил выявить рефлексы, принадлежащие фазам  $\gamma$ -Fe, CrN и  $\text{Fe}_4\text{N}$ . Данные фазы, в виде пластин, располагаются чередующимся образом  $\gamma$ -Fe / CrN или  $\gamma$ -Fe /  $\text{Fe}_4\text{N}$ .

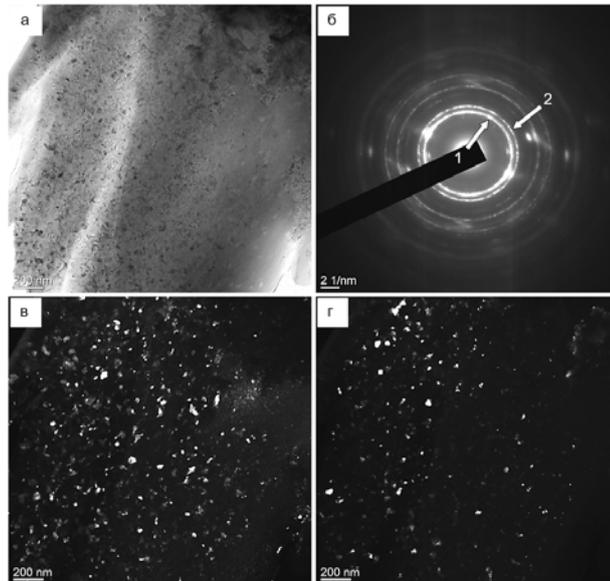


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя стали 20X23H18, подвергнутой азотированию в условиях нагрева образцов ионной составляющей плазмы: *a* – светлое поле; *b* – микроэлектроннограмма, полученная с данного участка фольги; *в, г* – темные поля, полученные в рефлексах  $[111] \gamma\text{-Fe} + [200] \text{CrN}$  (*в*) и  $[200] \gamma\text{-Fe}$  (*г*). Стрелкой указаны рефлексы (*б*), в которых получены темные поля – рефлекс № 1 (*в*) и № 2 (*г*)

Fig. 3. Electron microscopic image of the structure of the surface layer of steel 20X23H18 subjected to nitriding under conditions of heating of samples of the ionic component of the plasma:

*a* – bright field; *b* – microelectron diffraction pattern obtained from this section of the foil; (*c, d*) dark fields obtained in the  $[111] \gamma\text{-Fe} + [200] \text{CrN}$  (*c*) and  $[200] \gamma\text{-Fe}$  (*d*) reflections. In (*b*), the arrow indicates reflections in which dark fields were obtained reflection No. 1 (*c*) and reflection No. 2 (*d*)

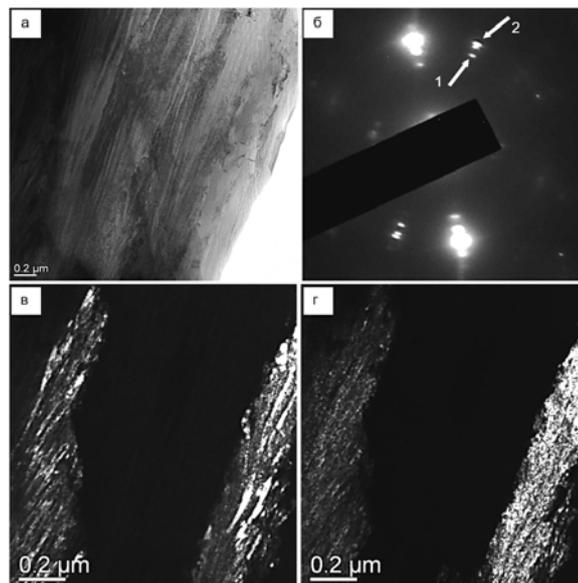


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя стали 20X23H18, подвергнутой азотированию в условиях нагрева образцов ионной составляющей плазмы: *a* – светлое поле; *б* – микроэлектроннограмма, полученная с данного участка фольги; *в, г* – темные поля, полученное в рефлексах  $[111] \text{CrN}$  (*в*) и  $[111] \gamma\text{-Fe} + [111] \text{Fe}_4\text{N}$  (*г*). Стрелкой указаны рефлексы (*б*), в которых получены темные поля – рефлекс № 1 (*в*) и № 2 (*г*)

Fig. 4. Electron microscopic image of the structure of the surface layer of steel 20X23H18 subjected to nitriding under conditions of heating of samples of the ionic component of the plasma:

*a* – bright field; *b* – microelectron diffraction pattern obtained from this section of the foil; (*c, d*) dark fields obtained in (*c*)  $[111] \text{CrN}$  and (*d*)  $[111] \gamma\text{-Fe} + [111] \text{Fe}_4\text{N}$  reflections. In (*b*), the arrow indicates the reflections in which dark fields were obtained reflection No. 1 (*c*) and reflection No. 2 (*d*)

## Заключение

Выполнен сравнительный анализ эволюции структуры, механических и трибологических свойств высокохромистой стали, подвергнутой азотированию в плазме несамостоятельного дугового разряда с накалимым катодом в условиях нагревания образцов до температуры азотирования, во-первых, ионной компонентой плазмы и, во-вторых, электронной и ионной компонентами плазмы. Установлено, что, независимо от способа нагревания образцов, твердость стали максимальна у поверхности азотирования и монотонно снижается по мере увеличения расстояния от поверхности образца. Показано, что толщина упрочненного слоя составляет 55–60 мкм и слабо зависит от метода азотирования, температуры (в интервале 793–873 К) и длительности (3–5 ч) процесса. Обнаружено, что при нагревании образцов ионами плазмы твердость упрочненного слоя (при равной толщине слоя) выше по сравнению с образцами, нагревание которых осуществлялось в электронно-ионном режиме.

Показано, что азотирование стали в условиях ионного нагревания образцов позволяет достигать более высоких значений микротвердости и износостойкости по сравнению с элионным методом нагревания. Достигая максимальной твердости при ионном режиме азотирования (793 К, 3 ч), сталь теряет износостойкость, параметр износа образцов для данного режима  $k = 3,44 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ , что в 4 раза больше параметра износа стали при сопоставимом элионном режиме азотирования (793 К, 3 ч). Установлено, что высокие прочностные и трибологические свойства азотированной стали обусловлены формированием в поверхностном слое нанокристаллической структуры, основными фазами которой являются нитриды железа  $\text{Fe}_4\text{N}$  и нитриды хрома  $\text{CrN}$ . Выявлено, что нагревание образцов до температуры азотирования в элионном режиме приводит к существенно меньшему (в 2,2–3,5 раза) уровню шероховатости материала по сравнению с образцами, нагревание которых при азотировании осуществляли ионной составляющей плазмы. Совокупность полученных результатов позволяет рекомендовать элионный режим азотирования стали для случая модифицирования изделий, в том числе ракетно-космической техники, не допускающих повышения уровня шероховатости поверхности.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке – грант РФФИ проект № 20-21-00111 Росатом.

**Acknowledgements.** The study was financially supported by the Russian Foundation for grant project №20-21-00111 Rosatom.

## Библиографические ссылки

1. Wei R., Benn C. R., Cooper C. V. High Intensity Plasma Ion Nitriding of Aer Met 100 Martensitic Steel // *Plasma Process. Polym.* 2007. Vol. 4, No. 1, P. 700–706.
2. Meletis E. I. Intensified plasma-assisted processing: science and engineering // *Surface and Coatings Technology.* 2002. Vol. 149, No. 2–3. P. 95–113.
3. Азотирование конструкционных сталей в газовых разрядах низкого давления / П. М. Щанин, Н. Н. Коваль, И. М. Гончаренко и др. // *Физика и Химия обработки материалов.* 2001. № 3. С. 16–19.
4. Synthesis of plasma-nitrided Cr coatings on HT9 steel for advanced chemical barrier property in a nuclear cladding application / S. Yeo, C. M. Lee, H. Soo et al. // *Applied Surface Science.* 2022. Vol. 579. P. 152133.
5. The influence of the plasma-nitriding temperature on the microstructure evolution and surface properties of additive-manufactured 18Ni300 maraging steel / M. Godec, F. Ruiz-Zepeda, B. Podgornik et al. // *Surface and Coatings Technology.* 2022. Vol. 433. P. 128089.
6. Electron-ion-plasma modification of carbon steel / Y. H. Akhmadeev, Yu. F. Ivanov, O. V. Krysinina et al. // *High Temperature Material Processes.* 2021. No. 25(1). P. 47–55.

7. Elion method of nitriding of high-chromium stainless steel: Structure and properties / Y. Ivanov, I. Lopatin, Y. Denisova et al. // *Proceedings – 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE-2020*. 2020. P. 783–787.
8. Elion Method of Nitriding of High-Chromium Stainless Steel: Structure and Properties / Y. Ivanov, I. Lopatin, Y. Denisova et al. // *IEEE*. 2020. P. 783–787.
9. Азотирование высокохромистой стали в плазме несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым катодом / Ю. Ф. Иванов, И. В. Лопатин, Е. А. Петрикова и др. // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. В 2 кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. Обработка металлов давлением*. Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2022. С. 98–106.
10. Структура и свойства высокохромистой стали, подвергнутой азотированию в плазме несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым катодом / С. П. Ереско, Ю. Ф. Иванов, А. А. Клопотов и др. // *Решетневские чтения : материалы XXVI Междунар. науч.-практ. конф. (09–11 ноября 2022, г. Красноярск)*. В 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2022. С. 627–629.
11. Формирование структуры, механических и трибологических свойств высокохромистой стали электронно-ионно-плазменным азотированием / С. П. Ереско, Ю. Ф. Иванов, Е. А. Петрикова и др. // *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2021. Т. 22, № 4. С. 688–699.
12. Лякишев Н. П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. М. : Машиностроение, 1996–2000. Т. 1–3.
13. Kubaschewski O. *Iron – Binary Phase Diagrams*. Berlin: Springer-Verlag, 1982. 184 p.
14. Etmayer P. Beitrag zum System Chrom-Kohlenstoff-Stickstoff. *Monatshefte für Chemie und verwandte Teileanderer // Wissenschaften*. 1966. Vol. 97. P. 1248–1257.
15. Du H. A Reevaluation of the Fe-N and Fe-C-N Systems // *Journal of Phase Equilibria*. 1993. Vol. 14, No. 6. P.682–894.

## References

1. Wei R., Benn C. R., Cooper C. V. High Intensity Plasma Ion Nitriding of Aer Met 100 Martensitic Steel. *Plasma Process. Polym*, 2007, Vol. 4, No. 1, P. 700–706.
2. Meletis E. I. Intensified plasma-assisted processing: science and engineering. *Surface and Coatings Technology*. 2002, Vol. 149, No. 2–3, P. 95–113.
3. Shanin P. M., Koval N. N., Goncharenko I. M. [Nitriding of structural steels in low pressure gas discharges]. *Physics and Chemistry of Material Processing*. 2001, No 3, P. 16–19 (In Russ.).
4. Yeo S., Lee C. M., Soo H. Synthesis of plasma-nitrided Cr coatings on HT9 steel for advanced chemical barrier property in a nuclear cladding application. *Applied Surface Science*. 2022, Vol. 579, P. 152133.
5. Godec M. Ruiz-Zepeda F., Podgornik B. The influence of the plasma-nitriding temperature on the microstructure evolution and surface properties of additive-manufactured 18Ni300 maraging steel. *Surface and Coatings Technology*. 2022, Vol. 433, P. 128089.
6. Akhmadeev Y. H., Ivanov Yu. F., Krysina O. V. Electron–ion–plasma modification of carbon steel. *High Temperature Material Processes*. 2021, No. 25(1), P. 47–55.
7. Ivanov Y., Lopatin I., Denisova Y. et al. Elion method of nitriding of high-chromium stainless steel: Structure and properties. *2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE-2020*. 2020, P. 783–787.
8. Ivanov Y., Lopatin I., Denisova Y. et al. Elion Method of Nitriding of High-Chromium Stainless Steel: Structure and Properties. *IEEE*. 2020, P. 783–787.
9. Ivanov Yu. F., Lopatin I. V., Petrikova E. A. et al. *Azotirovanie vysokohromistoj stali v plazme nesamostoyatel'nogo dugovogo razryada s nakalennym katodom* [Nitriding of high-chromium steel in plasma of a non-self-sustained arc discharge with a heated cathode]. Minsk, FTI NAN, 2022. P. 98–106.

10. Eresko S. P., Ivanov Yu. F. et al. [Structure and properties of high-chromium steel subjected to nitriding in plasma of a non-self-sustained arc discharge with a heated cathode]. *Reshetnevskie chteniya: materialy XXVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Reshetnev Readings: Proceedings of the XXVI International Scientific and Practical Conference]. November 9–11, 2022, Krasnoyarsk, under the general. ed. Yu. Yu. Loginova; Sib. state aerospace un-t. Krasnoyarsk, 2022, P. 627–629.

11. Eresko S. P., Ivanov Yu. F., Petrikova E. A. et al. [Formation of the structure, mechanical and tribological properties of high-chromium steel by electron-ion-plasma nitriding]. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 4, P. 688–699 (In Russ.).

12. Lyakishev N. P. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem 1996–2000* [Dual Metal System State Diagrams]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1996–2000, Vol. 1–3.

13. Kubaschewski O. Iron – Binary Phase Diagrams. Berlin: *Springer-Verlag*. 1982, 184 p.

14. Etmayer P. Beitragzum System Chrom-Kohlenstoff-Stickstoff. Monatshefte für Chemie und verwandte Teileanderer. *Wissenschaften*. 1966, Vol. 97, P. 1248–1257.

15. Du H. A Reevaluation of the Fe-N and Fe-C-N Systems. *Journal of Phase Equilibria*. 1993, Vol. 14, No. 6, P.682–894.

© Ереско С. П., Иванов Ю. Ф., Лопатин И. В., Клопотов А. А., Никоненко А. В., 2023

---

**Ереско Сергей Павлович** – доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель Российской Федерации, член-корреспондент Академии наук ВШ РФ, профессор кафедры основ конструирования машин; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: eresko07@mail.ru.

**Иванов Юрий Федорович** – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник; Институт сильноточной электроники СО РАН. E-mail: yufi55@mail.ru.

**Лопатин Илья Викторович** – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории; Институт сильноточной электроники СО РАН. E-mail: lopatin@opee.hcei.tsc.ru.

**Клопотов Анатолий Анатольевич** – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры прикладной механики и материаловедения; Томский государственный архитектурно-строительный университет. E-mail: klopotovaa@tsuab.ru.

**Никоненко Алиса Владимировна** – кандидат технических наук, ассистент кафедры физики; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. E-mail: aliska-nik@mail.ru.

**Eresko Sergei Pavlovich** – Dr. Sc., professor, Corresponding member of Academy of Higher Education of the Russian Federation, honored inventor of the Russian Federation, Department of Fundamentals of machine design, Institute of Mechanical Engineering and Mechatronics; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: eresko07@mail.ru.

**Ivanov Yurii Fedorovich** – Dr. Sc., assistant professor, senior scientist; Institute of High Current Electronics SB RAS. E-mail: yufi55@mail.ru.

**Lopatin Ilya Viktorovich** – PhD, Researcher; Institute of High Current Electronics SB RAS. E-mail: lopatin@opee.hcei.tsc.ru

**KlopotovAnatolii Anatolevich** – Dr. Sc., professor; Tomsk State University of Architecture and Building. E-mail: klopotovaa@tsuab.ru.

**Nikonenko Alisa Vladimirovna** – PhD, Assistant of the Department of Physics; Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. E-mail: aliska-nik@mail.ru.

---